

**С.В. БАРАНОВСЬКИЙ**

Навчально-науковий інститут автоматики, кібернетики і обчислювальної техніки Національного університету водного господарства та природокористування, Рівне, Україна, e-mail: *svbaranovsky@gmail.com*.

**А.Я. БОМБА**

Навчально-науковий інститут автоматики, кібернетики і обчислювальної техніки Національного університету водного господарства та природокористування, Рівне, Україна, e-mail: *abomba@ukr.net*.

**С.І. ЛЯШКО**

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна, e-mail: *lyashko.serg@gmail.com*.

**УЗАГАЛЬНЕННЯ МОДЕЛІ ПРОТИВІРУСНОЇ ІМУННОЇ ВІДПОВІДІ  
ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО УРАХУВАННЯ ДИФУЗІЙНИХ ЗБУРЕНЬ,  
ТЕМПЕРАТУРНОЇ РЕАКЦІЇ ОРГАНІЗМУ ТА ЛОГІСТИЧНОЇ  
ПОПУЛЯЦІЙНОЇ ДИНАМІКИ АНТИГЕНІВ**

**Анотація.** Узагальнено математичну модель Марчука–Петрова противірусної імунної відповіді для комплексного урахування дифузійних збурень, зосереджених впливів, температурної реакції організму та логістичної популяційної динаміки вірусних елементів і антитіл на розвиток інфекційного захворювання. Розроблено покрокову процедуру чисельно-асимптотичного розв’язання відповідних сингулярно збурених задач із запізненнями. Наведено результати комп’ютерного моделювання, які ілюструють вплив «модельного» зниження максимального рівня кількості антигенів в епіцентрі зараження внаслідок їхнього дифузійного «розсіювання», температурної реакції організму та логістичної популяційної динаміки вірусів на характер перебігу інфекційного захворювання, зокрема і за наявності зосереджених джерел антигенів. Зазначено, що така системна дія вказаних чинників може спричинити зниження початково надкритичної концентрації антигенів до рівня, після якого їхню нейтралізацію і виведення з організму буде забезпечено наявним рівнем імунного захисту, що є важливим під час прийняття рішень щодо необхідності застосування зовнішнього «лікувального» впливу.

**Ключові слова:** модель противірусної імунної відповіді, динамічні системи із запізненням, асимптотичні методи, сингулярно збурені задачі, зосереджені впливи, логістична динаміка.

**ВСТУП**

Математичне моделювання процесу реагування імунної системи на виявлені в організмі збудники хвороби, яке дає змогу прогнозувати перебіг інфекційного захворювання в різних умовах та з урахуванням різних впливів, є важливим елементом у спеціалізованих експертних системах для підтримки прийняття рішень під час розроблення ефективних програм лікування, керування функціонуванням імунної систем тощо. В основу класичного підходу до побудови моделей процесів інфекційних та бактеріальних захворювань покладено так звану клонально-селекційну теорію Ф. Бернета [1]. Зокрема, у запропонованій Г.І. Марчуком найпростішій моделі інфекційного захворювання [1] базові механізми імунного захисту організму описуються системою нелінійних диференціальних рівнянь із запізненням, що визначають швидкості зміни кількості антигенів, плазматичних клітин, антитіл та деякої міри ураження органа-мішені. В [1], поміж іншого, також показано, що стаціонарний розв’язок найпростішої моделі, який описує стан здорового організму, є асимптотично стійким та зберігає таку стійкість у випадку початкового зараження організму дозою антигенів  $V^0$ , що не перевищує деякого рівня імунного бар’єра  $V^*$ . Більш складна модель Марчука–Петрова противірусної імунної відповіді [1] побудована для урахування, окрім гуморального, ще й механізмів імунного захисту клітинного типу.

© С.В. Барановський, А.Я. Бомба, С.І. Ляшко, 2022